

## 白龙江与小江泥石流流域地貌演化比较分析

黄江成<sup>1</sup>, 欧国强<sup>2</sup>, 潘华利<sup>2</sup>

(1. 云南大学 亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091; 2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 甘肃白龙江和云南小江是我国著名的暴雨泥石流区域, 灾害频发、危害严重。本研究选取白龙江和小江流域主要泥石流沟, 通过分析主沟比降和流域面积~高程曲线, 定量分析流域的地貌演化阶段, 比较两流域主要泥石流沟在地貌演化上的异同。研究发现两个流域的主要泥石流沟绝大多数处在壮年期, 表明在未来较长的时间内, 两个流域的泥石流活动还将持续; 小江流域泥石流沟在发育阶段上略迟于白龙江流域; 处在同一演化阶段不同线型的泥石流流域, 上凸型和中凸型更有利于泥石流活动。正确判断泥石流沟所处的发展阶段对于泥石流沟防灾减灾工作具有重要意义。

**关键词:** 白龙江流域; 小江流域; 泥石流; 地貌演化; 面积-高程曲线

文章编号: 1003-8035(2014)01-0006-06

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

## 0 引言

地貌演化一直是地貌学领域内的重要研究课题之一。根据美国地貌学家 W. M. Davis 1899 年提出的“地理循环”学说, 地貌演化是构造、时间和营力的函数, 三个变量的不同组合变化, 可把地形发育分为幼年期、壮年期和老年期。泥石流的发育和其它自然现象一样, 有其发生、发展和消亡的过程。不同发育阶段的泥石流流域, 其沟谷形态、活动强度和危害程度也不同。对于许多小流域, 崩塌、滑坡产生的物质往往通过沟谷, 以泥石流的形式输移到流域的外面, 因此泥石流流域实际上是一个谷~坡耦合系统<sup>[1]</sup>。反映流域谷-坡系统的参数众多(包括切割密度、坡度、坡向、相对高差、主沟比降和坡面形态等), 由于主沟比降和坡面形态不但可以反映“谷”、“坡”的演化阶段, 还能表征泥石流流域的稳定性与发展演化趋势, 是侵蚀流域地貌演化阶段的一种外在表现形式, 可选作泥石流的综合地貌指标<sup>[2]</sup>。

本文选取白龙江和小江流域的主要泥石流沟, 运用 Strahler 提出的面积~高程曲线法, 结合流域的主沟比降, 分析两流域主要泥石流沟在地貌演化阶段的异同, 正确判断泥石流流域所处的发展阶段对于泥石流防灾减灾工作具有重要意义。

## 1 面积高程与地貌演化阶段

随着 Davis 提出地貌演化理论, 许多学者开始了地貌发育阶段的定量分析。1952 年美国地貌学家 A. N. Strahler 提出的面积~高程曲线法<sup>[3]</sup>, 对 Davis

的地理循环各个阶段进行了定量划分, 直观的反应了流域演化过程中“面”的变化, 可作为流域三维整体的概化。国内一些学者运用该理论对地貌演化阶段进行了定量分析的相关研究<sup>[4-8]</sup>。通过一系列  $(x_i, y_i)$ , 可得到流域面积~高程曲线的关系曲线:

$$y = f(x) \quad (1)$$

式中:  $x, y$ ——横纵坐标,  $x, y$  取值范围  $[0, 1]$ ,  $x = a/A$ ,  $y = h/H$ ;  $a$  为每一条等高线以上的控制面积;  $A$  为泥石流流域面积;  $h$  每条等高线与流域最低点的相对高差;  $H$  为流域相对高差。

地形发育阶段函数  $I$ :

$$I = \int_0^1 f(x) dx \quad (2)$$

幼年期:  $I > 0.60$ ; 壮年期:  $0.35 \leq I \leq 0.60$ ; 老年期:  $I < 0.35$ 。

$I$  为曲线和  $x$  轴、 $y$  轴包含面积与整个方块的面积之比(图 1)。当  $I > 0.6$  时, 表示流域的地表物质被侵蚀  $< 40\%$ , 面积表示了流域的整体侵蚀状况, 而

收稿日期: 2013-05-23; 修订日期: 2013-09-27

基金项目: 自然科学基金项目“怒江流域高山峡谷区泥石流活动性定量研究”(41301595); 水利部公益性行业科研专项经费项目“汶川震区山洪灾害风险评估及防灾减灾范式”(201301058); 云南省教育厅科学研究基金项目“巧家水碾河降雨特征及泥石流雨量阈值研究”(2012Y447)

作者简介: 黄江成(1981—), 男, 云南鹤庆人, 博士, 助理研究员, 研究方向为山地灾害。

E-mail: explor99@163.com

曲线的形状则直观反映了流域不同部位的侵蚀特征, 坡面形状是侵蚀流域地貌演化阶段的一种外在表现形式。

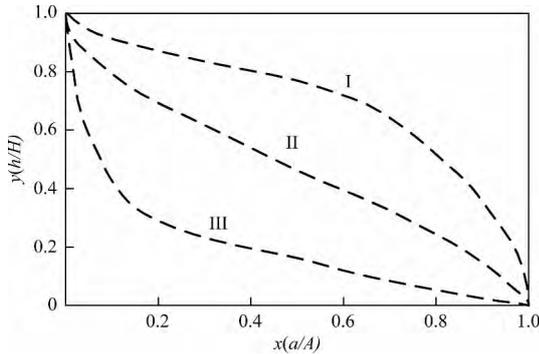


图 1 面积 ~ 高程积分曲线划分地貌发育阶段示意图

Fig. 1 The geomorphologic evolution stage reflected by the integral curve of Area-Altitude

## 2 白龙江和小江泥石流发育概况

白龙江和小江流域地处我国西南地形急变带, 由于地层破碎、新构造运动强烈、地形陡峻, 植被稀少, 加之多短历时强降雨, 人为扰动强烈, 极有利于泥石流的发育及活动<sup>[9]</sup>, 成为长江上游泥石流灾害最为严重的区域<sup>[10]</sup>。白龙江位于川甘境内, 自西北流向东南, 主要受白龙江深大断裂的控制, 流域相对高差超过 4000m。干流河道平均坡降约为 3.4‰, 其中, 舟曲以上平均比降超过 10‰, 碧口以下平均坡降约 1.4‰(图 2)。

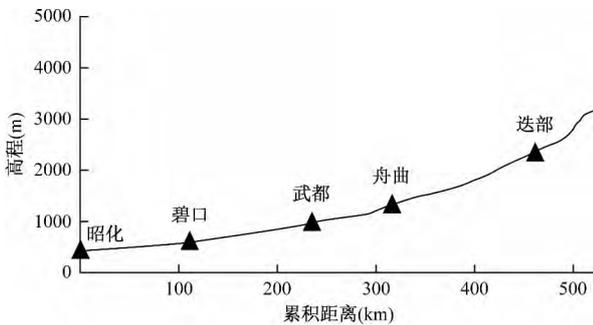


图 2 白龙江干流纵剖面图

Fig. 2 The longitudinal profile of Bailong river

小江流域位于金沙江中游右岸, 地处川、滇中山地区, 以南北向发育的小江深大断裂为主控制线。流域内相对高差 3500m, 最低点为小江汇口, 海拔 695m, 干流平均比降 10.3‰(图 3)。小江流域泥石流分布之广, 类型之齐全、活动之频繁、规模之巨大以

及危害之严重, 均属国内罕见<sup>[11]</sup>, 小江流域每年的土壤侵蚀量高达  $4200 \times 10^4 t$ , 年土壤侵蚀量高达  $1.38 \times 10^4 t/km^2$  (JACA 2005)。

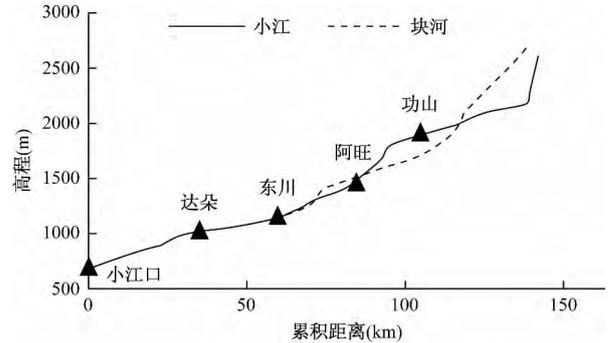


图 3 小江干流、块河纵剖面图

Fig. 3 The longitudinal profile of Xiaojiang river

调查表明白龙江干流共分布一定规模的泥石流沟 250 条, 中上游地区是分布密度最大、暴发频率最高的地区, 旺藏 ~ 碧口河段泥石流分布线密度为 0.82 条/km。小江流域的泥石流沟在功山以下的小江干流以及块河两岸密集分布, 共发育泥石流沟 122 条, 其中功山 ~ 小江口河段泥石流分布线密度为 0.83 条/km。

考虑地理位置、流域面积、泥石流性质和历史灾害情况等因素, 分别选取主要泥石流沟。白龙江干流各主要泥石流沟主要特征参数见表 1, 其中北峪河、火烧沟、泥湾沟、甘家沟和三眼峪沟, 历史上或发生过重大灾害, 或泥石流发生频率较高; 小江干流各主要泥石流沟主要特征参数见表 2, 包括了流域中最为著名的蒋家沟、大白泥沟和小白泥沟, 近几十年来几乎每年都暴发不同规模的泥石流。

根据表 1、2 可知, 白龙江干流主要泥石流沟平均流域面积  $26.43 km^2$ , 小江干流为  $35.40 km^2$ 。流域山坡坡度方面, 白龙江流域大部分地区坡度范围在  $15^\circ \sim 40^\circ$ , 小江流域则主要分布在  $10^\circ \sim 35^\circ$  的范围内。

主沟比降反映了流域的沟道演化的状况, 是表征泥石流沟谷水动力条件的重要参数, 对泥石流活动度有一定影响。大量统计分析表明<sup>[12]</sup>, 300‰左右沟床比降有利于泥石流的形成, 沟床比降过大, 与松散物质休止角相当, 易发生坡面泥石流; 沟床比降过小, 则松散物质起动难度大。白龙江干流主要泥石流沟平均比降为 271.20‰, 小江干流主要泥石流沟平均比降为 209.56‰, 相对高差小江泥石流沟大于白龙江泥石流沟(图 4)。

表 1 白龙流域主要泥石流沟特征值一览表

Table 1 The main debris flow gullies' characteristic values of Bailong river

沟名	形心坐标		面积( km <sup>2</sup> )	主沟长( km)	主沟比降( ‰)	泥石流性质
	东经( 度)	北纬( 度)				
北峪河	105.01	33.51	429.32	36.91	31.08	稀性泥石流
泥湾沟	104.79	33.46	10.93	5.97	211.24	粘性泥石流
三眼峪	104.39	33.82	24.46	9.15	23.68	粘性泥石流
甘家沟	105.01	33.41	41.16	11.51	86.33	粘性泥石流
火烧沟	104.76	33.48	2.13	3.31	343.09	粘性泥石流
柳湾沟	104.59	33.61	2.68	4.42	270.19	粘性泥石流
燕湾沟	104.99	33.37	1.31	3.02	221.00	粘性泥石流
小坝子沟	104.63	33.60	5.12	4.60	236.21	粘性泥石流
燕儿沟	104.99	33.37	3.58	4.34	193.76	粘性泥石流
草坝子西沟	104.73	33.46	1.28	2.24	456.33	粘性泥石流
王沟	104.97	33.39	3.27	4.25	264.32	稀性泥石流
草坝子沟	104.74	33.46	1.19	2.06	475.32	粘性泥石流
张家咀沟	104.96	33.33	6.62	6.64	218.09	稀性泥石流
白玉沟	104.76	33.47	1.48	2.38	355.83	粘性泥石流
石门沟	104.75	33.54	46.05	14.41	100.43	粘性泥石流
新农庄沟	104.85	33.42	0.78	1.84	294.30	粘性泥石流
麻渣沟	104.88	33.39	1.02	2.30	476.12	稀性泥石流
铁匠沟	104.99	33.14	1.10	2.59	329.68	粘性泥石流
硝水沟	104.76	33.46	0.75	1.76	381.00	粘性泥石流
喇沟	105.01	33.13	6.47	4.74	266.53	粘性泥石流
灰崖子沟	104.88	33.41	0.93	2.08	419.06	粘性泥石流
淘沙沟	104.85	33.43	3.47	4.30	420.22	粘性泥石流
百草坝沟	104.70	33.56	12.77	7.84	163.65	粘性泥石流

表 2 小江流域主要泥石流沟特征值一览表

Table 2 The main debris flow gullies' characteristic values of Xiaojiang river

沟名	形心坐标		面积( km <sup>2</sup> )	主沟长( km)	主沟比降( ‰)	泥石流性质
	东经( 度)	北纬( 度)				
幸福村沟	103.05	26.45	4.78	5.16	220.76	粘性泥石流
豆腐沟	103.05	26.42	18.80	8.73	142.04	粘性泥石流
太平村沟	103.12	26.40	10.41	6.35	270.91	粘性泥石流
尖山沟	103.19	26.33	175.32	33.25	83.90	稀性泥石流
达朵沟	103.05	26.26	50.37	12.33	178.50	粘性泥石流
蒋家沟	103.17	26.25	47.10	13.56	151.16	粘性泥石流
大桥河	103.18	26.19	112.42	16.25	161.26	粘性泥石流
石羊沟	103.21	26.08	16.92	8.38	218.40	粘性泥石流
小海河	103.24	26.07	32.35	13.04	179.39	粘性泥石流
铜厂箐	107.18	26.02	8.25	4.49	240.32	粘性泥石流
乌龙河	103.09	26.02	140.79	26.31	61.59	稀性泥石流
大白泥沟	103.19	25.98	19.47	10.87	149.10	粘性泥石流
小白泥沟	103.20	25.97	12.69	7.36	217.30	粘性泥石流
拖沓沟	103.22	25.89	9.31	7.38	216.86	粘性泥石流
达德沟	103.26	26.03	15.19	8.15	228.81	粘性泥石流
桃家小河	103.31	25.99	67.91	15.53	86.31	粘性泥石流
黑水河	103.26	26.01	13.80	9.25	207.66	粘性泥石流
许家小河	103.28	25.95	9.77	7.05	225.40	稀性泥石流
黑沙沟	103.27	25.94	3.03	3.63	286.34	粘性泥石流
深沟	103.22	26.12	30.18	13.01	211.31	粘性泥石流
红沙沟	103.25	25.97	1.75	2.22	407.11	粘性泥石流
小石洞河	103.26	25.99	4.95	4.81	386.77	粘性泥石流
老干沟	103.23	26.04	8.62	5.37	288.75	粘性泥石流

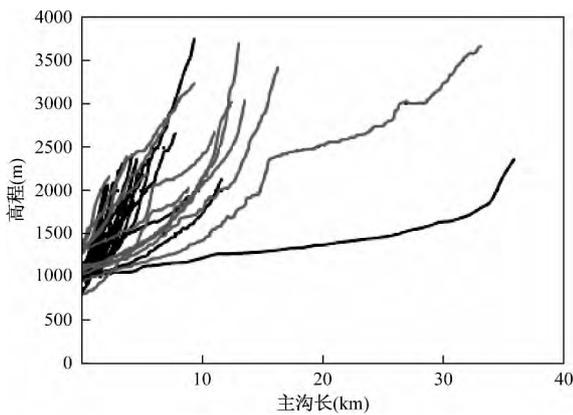


图 4 白龙江小江主要泥石流沟纵剖面  
(浅色:小江流域 深色:白龙江流域)

Fig. 4 The longitudinal profile of main debris flow gullies of Bailong River and Xiaojiang river

### 3 白龙江和小江泥石流流域演化阶段分析

根据白龙江和小江 1:10 万比例尺的地形图等高线,分别量算出  $a$ 、 $A$ 、 $h$ 、 $H$ , 得出一系列的坐标对  $(x_i, y_i)$  绘制出各泥石流流域的面积~高程曲线(图 5、6)。通常计算流域发育阶段的方法为对面积~高程

曲线进行拟合后积分计算得出,本文运用 Arcmap 强大的空间分析功能,利用相似比例原理,对面积高程曲线数字化后求出。

通过对两个流域主要泥石流沟发育阶段的计算,白龙江干流泥石流沟的发育阶段介于 0.35 ~ 0.62 之间,平均值 0.48,按地貌发育阶段划分结果:22 条为壮年期,仅硝水沟 1 条处在老年期,其面积高程曲线面积积分为 0.62。小江流域主要泥石流流域面积~高程曲线积分在 0.31 ~ 0.66 之间,平均值为 0.50,其中发育阶段为壮年期的为 19 条,占总数的 82.6%;发育阶段为幼年期的有 3 条,分别为豆腐沟、红沙沟和黑水河;仅石羊沟为老年期。

进一步分析各泥石流流域面积~高程曲线发现,虽然大部分泥石流沟发育阶段属于壮年期,但面积~高程曲线表现 4 四种不同的类型:近直线型、上凸型、中凸型和下凸型。如燕湾沟为近直线型、豆腐沟为上凸型、蒋家沟为中凸形、石门沟为下凸型。流域面积~高程曲线代表流域不同部位受侵蚀的程度,上凸型表示上部侵蚀弱,下部侵蚀强烈,下凸型则相反,中凸型代表中部侵蚀较弱、近直线型则表示流域整体侵蚀状况相当。

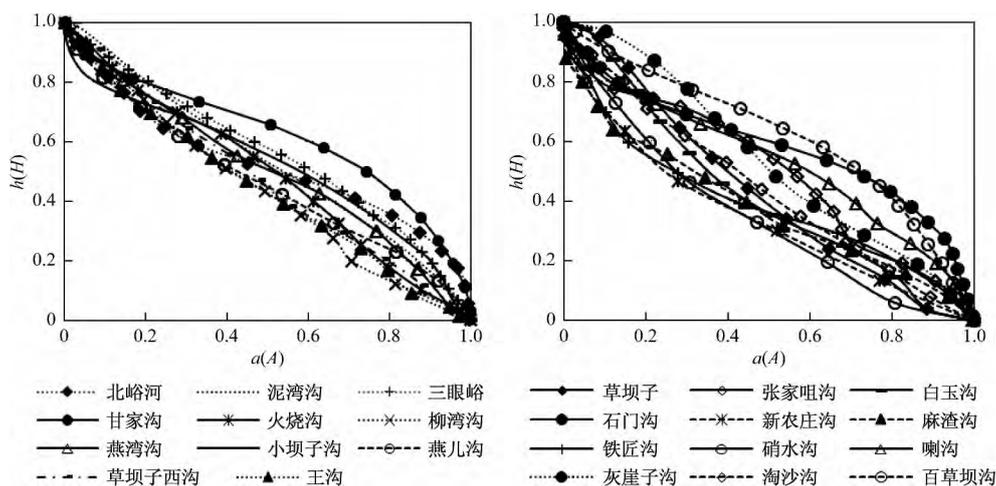


图 5 白龙江流域泥石流沟面积~高程曲线

Fig. 5 The Area-Altitude curve of debris flow gullies in Bailong river basin

根据泥石流流域不同部位的划分,上部为形成区,中部为流通区,下部为堆积区,即上凸型或中凸型的地貌演化阶段更有利于提供大量的松散物质。如蒋家沟、大白泥沟、小白泥沟、火烧沟和燕湾沟等都属于这两种类型。

### 4 结论

(1) 白龙江代表性泥石流沟主沟平均比降 271.20‰,小江干流主要泥石流沟平均比降为 209.56‰,白龙江干流泥石流主沟比降高于小江流域

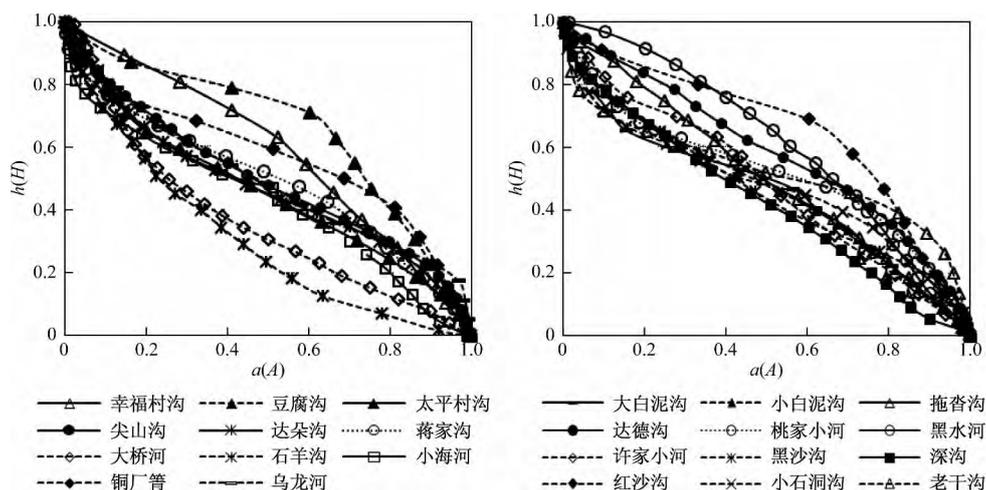


图6 小江流域泥石流沟面积~高程曲线

Fig. 6 The Area-Altitude curve of Debris flow gullies in Xiaojiang river basin

泥石流沟 相对高差则小江泥石流沟大于白龙江泥石流沟。

(2) 白龙江和小江流域的泥石流沟大多处在地貌演化的壮年期阶段,白龙江和小江分别为 95.7% 和 82.6%,即在较长的时间内,两个流域的泥石流还将持续活动。

(3) 流域间主要泥石流沟演化阶段比较结果显示,小江流域泥石流所处演化阶段略迟于白龙江流域,小江流域平均值为 0.50,白龙江为 0.48,小江有幼年期的泥石流沟 3 条,白龙江无幼年期泥石流沟。

(4) 比较同一演化阶段不同线型的泥石流活动状况发现,上凸型和中凸型均有利于泥石流活动,下凸型的演化类型不利于泥石流的活动。

#### 参考文献:

- [1] 李泳,陈晓清,胡凯衡,等. 流域特征曲线与泥石流活动[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 320-326.  
LI Yong, CHEN Xiaoqing, HU Kaiheng et al. Characteristic curves and debris flow activity of a valley [J]. Journal of Mountain Science 2006 24(3): 320-326.
- [2] 李德基. 泥石流灾害理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 95-104.  
LI Deji. Theory and practice of debris flow mitigation [M]. Beijing: Science Press, 1997: 95-104.
- [3] Strahler, A. N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1952, 63: 1117-1142.
- [4] 钟南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1987, 1(2): 1-7.  
ZHONG Nanshan. Comentropy in erosional drainage-system [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(2): 1-7.
- [5] 李克煌,管华,马建华,等. 自然地理界面理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 230-237.  
LI Kehuang, GUAN Hua, MA Jianhua, et al. Interface theory and practice of physical geography [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 230-237.
- [6] 管华,高更和,秦岭——黄淮平原交界带地貌演化阶段的信息熵判定[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 673-676.  
GUAN Hua, GAO Genghe. Distinguishing of the geomorphic evolution stage with information entropy in the transitional region of Qinling mountains and Huang-Huai plain [J]. Acta Geographica Sinica 2002 22(6): 673-676.
- [7] 阮诗昆,庄儒新. 泥石流流域地貌发育阶段的定量分析[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(6): 695-697.  
RUAN Shikun, ZHUANG Ruxin. The Quantitative analysis on the stage of the geomorphologic evolution in debris flow area [J]. Resources Environment & Engineering, 2007, 21(6): 695-697.
- [8] 李泳,胡凯衡,苏凤环,等. 流域演化与泥石流的系统性——以云南东川蒋家沟为例[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 449-456.  
LI Yong, HU Kaiheng, SU Fenghuan, et al. Debris flow viewed from the Basin evolution—A case study of Jiangjia gully. Yunnan Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 449-456.
- [9] 李鸿琏,曾思伟. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 44-48.  
LI Honglian, ZENG Siwei. Gansu debris flow [M].

- Beijing: China Communications Press, 1982: 44 - 48.
- [10] 柳金峰, 黄江成, 欧国强, 等. 甘肃陇南武都区泥石流易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 8 - 13.
- LIU Jinfeng, HUANG Jiangcheng, OU Guoqiang, et al. Susceptibility evaluation of debris flow in the Wudu district, Longnan city, Gansu province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010 21(4): 8 - 13.
- [11] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 1 - 6.
- DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian, et al. Comprehensive investigation and control planning for debris flows in Xiaojiang river basin of Yunnan province [M]. Sci and Tech Press, Chongqing Branch, 1987: 1 - 6.
- [12] 陈景武, 朱平一, 汪凯, 等. 长江上游暴雨泥石流形成的雨量条件和预报参数研究 [R]. 1994: 47 - 48.
- CHEN Jingwu, ZHU Pingyi, WANG Kai, et al. The study on the rain condition and forecast parameter of rainstorm debris flow in upper Yangtze River [R]. 1994: 47 - 48.

## Geomorphic evolution of comparison on debris flow gullies in Bailongjiang and Xiaojiang basins

HUANG Jiang-cheng<sup>1</sup>, OU Guo-qiang<sup>2</sup>, PAN Hua-li<sup>2</sup>

(1. Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Geologic disasters happened frequently in both Bailongjiang basin and Xiaojiang basin and have caused great damages. Taking Xiaojiang basin and Bailongjiang basin as the targets, this paper analyzed the geomorphic evolution stages of the two basins quantitatively. Additionally, this paper compared the similarities and differences of the geomorphic evolution by analyzing the longitudinal gradient and by using altitude-area curve. It indicates that most of the gullies in these two basins would be in maturity stage at present, that is to say debris flow activities will be going on in a long term. Otherwise, gully which is on the up-convex or middle-convex will be much more active compared to the others. In addition, the average evolution stage in Xiaojiang basin is later than that in Bailongjiang basin. A correct judgment on the stage of evolution stage has significant importance for the disaster prevention and mitigation of debris flow.

**Key words:** Bailongjiang basin; Xiaojiang basin; debris flow; geomorphic evolution; altitude-area curve

### 《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编办公系统运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从 2013 年 3 月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台(<http://zgdzzyfz.paperopen.com/>), 不再使用原电子邮件投稿系统, 特此公告, 望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议, 请您电话 010-62170025 或者发邮件到 [nitx@mail.cigem.gov.cn](mailto:nitx@mail.cigem.gov.cn)。

注意: 投稿作者请仔细阅读首页导航栏——投稿须知!

期刊编辑部